

И. И. Фахразиев, В. Н. Диденко

Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова, г. Ижевск, ilsha-22@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ НЕСТАБИЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВКАХ

Разработан метод расчетного определения степеней сжатия природного газа на границах трех областей: бездетонационной, с неустойчивой детонацией и гарантированной (100 %-ной) детонацией. Полагается, что температура самовоспламенения природного газа с высоким содержанием метана (96–98 % по объему) полностью определяется температурой самовоспламенения метана. Границы области неустойчивой детонации графически находились как точки пересечения кривой изменения температуры при сжатии газовой смеси с кривыми верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения этой смеси при различных степенях сжатия.

Ключевые слова: газопоршневая установка; детонация; природный газ; температура самовоспламенения; степень сжатия.

I. I. Fakhraziev, V. N. Didenko

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

DEFINITION OF BORDERS OF UNSTABLE DETONATION OF NATURAL GAS IN GAS-STANDING INSTALLATIONS

A method has been developed for calculating the values of the compression ratio of a natural gas for the boundaries of three isolated regions: a non-detonation, unstable detonation and guaranteed (100 %) detonation. It is believed that the autoignition temperature of natural gas with high methane content (96–98 % by volume) is completely determined by the autoignition temperature of methane. The boundaries of the region of unstable detonation were graphically located as points of intersection of the curve of temperature change upon compression of the gas mixture

with the curves of the upper and lower limits of the autoignition temperature of this mixture at different compression ratios.

Keywords: gas reciprocating unit; detonation; natural gas; auto ignition temperature; rate of compression.

Интерес авторов к вопросам детонации смесей углеводородов с воздухом обусловлен проводимыми в ИжГТУ исследованиями по утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) на месторождениях Удмуртской Республики. Как было показано в [1], наиболее экономичным способом утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) является использование его в качестве топлива для газопоршневых установок (ГПУ), вырабатывающих электроэнергию. Причиной детонации может быть «тепловой взрыв» – самовоспламенение газового топлива одновременно во всем объеме цилиндра от разогрева в процессе неизотермического (адиабатного или политропного) сжатия. Температура самовоспламенения газа не является его физико-химической постоянной, так как зависит от различных факторов [2]. Но анализ опытных данных, в частности представленных в таблице [3], показывает, что влияние этих факторов на температуру самовоспламенения углеводородных газов укладывается в определенные температурные границы.

Границы температуры самовоспламенения некоторых углеводородных газов при атмосферном давлении

Газ	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
$t_{CB}^H, ^\circ\text{C}$	545	530	504	430	284
$t_{CB}^H, ^\circ\text{C}$	800	694	588	570	510

Таким образом, можно ввести понятие о нижнем и верхнем пределах температуры самовоспламенения углеводородных газов. Из всех углеводородов, входящих в состав природного газа, метан имеет самый высокий верхний предел температуры самовоспламенения (800 °C). Достоверное определение температуры самовоспламенения смеси углеводородных газов произвольного состава возможно только в специальных опытах, поэтому для расчетного определения границ

бездетонационного сжатия природного газа полагалось, что его физико-химические свойства полностью соответствуют метану, являющийся основным компонентом природного газа (96–98 % по объему). Авторами были выполнены расчеты по определению температуры самовоспламенения метана при атмосферном давлении с использованием известных формул тепловой теории самовоспламенения газов [4]. При $P_{\text{атм}}$ получено расчетное значение температуры самовоспламенения метана $t_{\text{CB}} = 1694^{\circ}\text{C}$, в несколько раз превосходящее опытные значения (545–800 $^{\circ}\text{C}$). Таким образом, определение t_{CB} по формулам тепловой теории самовоспламенения дает плохое количественное согласование с имеющимися опытными данными, что объясняется проявлением цепного механизма самовоспламенения углеводородных газов.

Как показывают опыты, температура самовоспламенения углеводородных газов существенно зависит от давления. Для учета влияния давления на t_{CB} академиком Н. Н. Семеновым предложена зависимость [5]:

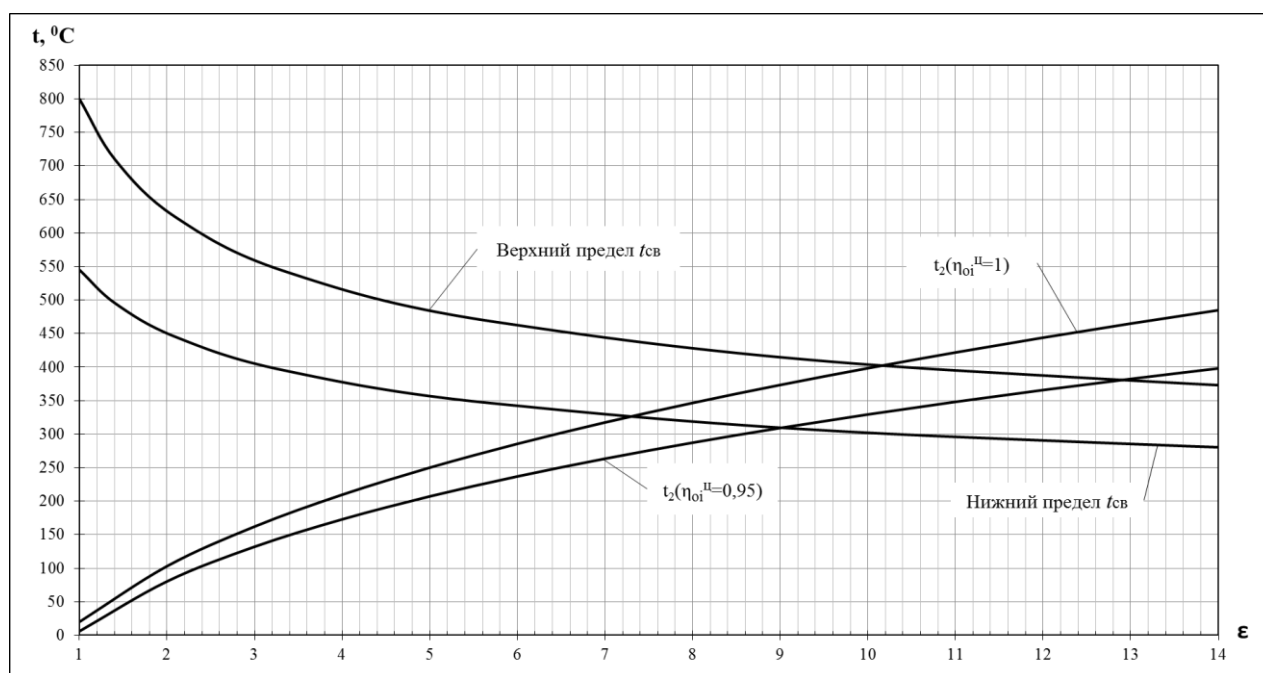
$$\ln \frac{P_{\text{CB}}}{T_{\text{CB}}^2} \approx \frac{E}{2RT_{\text{CB}}} + B$$

где B – постоянная величина, зависящая от состава смеси и условий теплоотдачи; P_{CB} – давление газовой смеси при самовоспламенении, МПа, E – эффективная энергия активации предпламенных реакций, кДж/кмоль.

На рисунке приведены кривые нижнего и верхнего пределов температуры самовоспламенения метана при различных степенях сжатия при показателе политропы сжатия $n = 1,36$.

На рисунке точки пересечения кривых верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения метана с температурными кривыми политропного сжатия ограничивают слева и справа область ε с нестабильной детонацией. Так при показателе политропы $n = 1,36$ и $\eta_{\text{oi}}^{\text{II}} = 0,95$ область с нестабильной детонацией ограничивается

значениями $\varepsilon = 9$ и $\varepsilon = 12,8$. При $\varepsilon < 9$ детонация при сжатии газа отсутствует, при $\varepsilon \geq 12,8$ детонация будет всегда, а в интервале от $\varepsilon = 9$ до $\varepsilon = 12,8$ детонация будет нестабильной. Нестабильность детонации объясняется влиянием факторов, приводящих к разнообразию опытных значений температуры самовоспламенения. В работе [6] опытным путем установлено, что при степенях сжатия до $\varepsilon = 9$ в газовом ДВС обеспечивается заведомо бездетонационное сгорание топлива. Эти опытные данные хорошо согласуются с результатами расчетов, приведенными выше. Следующим этапом на пути определения областей нестабильной детонации смесей ПНГ с воздухом в ГПУ должна стать определение температуры самовоспламенения произвольных смесей углеводородных газов при различных степенях сжатия.



Определение границ нестабильной детонации природного газа с использованием формулы Н. Н. Семенова [5]

Список использованных источников

1. Фахразиев И. И., Мерзлякова К. С., Диденко В. Н. Исследование возможности применения газотурбинных установок для утилизации попутного нефтяного газа с высоким содержанием азота на нефтяных месторождениях Удмуртской Республики // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15, № 4. С. 109–118.

2. Архипов В. А., Синогина Е. С. Горение и взрывы. Опасность и анализ последствий : учебное пособие. Томск : ТГПУ, 2007. 124 с.
3. Земенков Ю. Д. [и др.] Справочник инженера по эксплуатации нефтегазопроводов и продуктопроводов : учебно-практическое пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2006. 928 с.
4. Померанцев В. В. [и др.] Основы практической теории горения : учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
5. Семенов Н. Н. Цепные реакции. 2-е изд., испр. и доп. М. : Наука, 1986. 535 с.
6. Кузьменко А. П. Улучшение показателей малолитражного газового двигателя с искровым зажиганием за счёт выбора параметров, определяющих процесс сгорания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. Харьков, 2012. 20 с.